

Analyse d'un distillateur solaire actif avec récupération de chaleur

H. Osman Ali^a, A. Khamlichi^b, H. Ali Barkad^c

- a. Département de Physique, Faculté des Sciences de Tetouan, Tetouan 93030, Morocco, IUT-I, Université de Djibouti, Djibouti, arhiba@hotmail.com
- b. Département de Physique, Faculté des Sciences de Tetouan, Tetouan 93030, Morocco, khamlichi7@yahoo.es
- c. IUT-I, Université de Djibouti, Djibouti, hassan_ali_barkad@univ.edu.dj

Résumé :

Le dessalement par voie thermique solaire est une solution qui est économiquement viable à petite échelle. Dans ce travail, un distillateur solaire actif avec simple pente a été considéré. Le distillateur est une enceinte couverte d'un transparent en verre et voit circuler sous une plaque de cuivre disposée en son fond le fluide caloporteur chauffé par un récepteur solaire. Afin d'augmenter le rendement du système, on envisage une récupération de la chaleur du saumure sortant par échange avec l'eau de mer rentrant dans la cuve. L'objectif est d'étudier ce système de récupération à base de la simulation numérique. Nous avons pour cela traduit les différents échanges thermiques qui ont lieu dans l'installation. Nous avons ensuite intégré le modèle numériquement à l'aide d'un schéma approprié. Des études paramétriques étendues ont été réalisées dans le but d'évaluer la productivité en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur, la température d'entrée de l'eau de mer et la longueur du distillateur.

Abstract :

Sea water desalination by using solar energy can achieve low cost. In this work, an active solar still with a single slope is considered. In this system, the solar radiation passes through a transparent cover and supplies heat to sea water, meanwhile it is circulated and put in contact with a heat source which provides extra heat to the saline water. In order to increase the yield, recuperation of the heat stored in the brine at the exit of the system is analyzed. The objective is to study this system of recuperation by performing numerical simulation. The equations of the problem were derived by applying energy conservation for the different parts composing the installation. The model was then integrated by using an appropriate scheme and extensive parametric studies were conducted. This enabled to assess variability of the yield as function of the heat fluid input temperature, the saline water input temperature and the length of the still.

Mots clefs : Distillateur solaire active, dessalement, optimisation de transfert thermique, Evaporation/Condensation.

Nomenclature:

A_c	Aire de la surface de la plaque de cuivre (m^2)
A_{fc}	Aire de la surface de la cuve de fluide caloporteur (m^2)
A_v	Aire de la surface de l'enveloppe en verre (m^2)
A_{em}	Aire de la surface de la cuve de l'eau de mer (m^2)
$c_{p,c}$	Capacité thermique massique de cuivre ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$c_{p,em}$	Capacité thermique massique de l'eau de mer ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$c_{p,fc}$	Capacité thermique massique du fluide caloporteur ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$c_{p,s}$	Capacité thermique massique de la saumure ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$c_{p,v}$	Capacité thermique massique du verre ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D_{fc}	Débit volumique du fluide caloporteur ($m^3.s^{-1}$)
d_{em}	Profondeur de l'eau de mer (m)
e_v	Epaisseur du verre (m)
e_{is}	Epaisseur de l'isolant (m)
$I(t)$	Intensité solaire ($W.m^{-2}$)
h_L	Chaleur latente de vaporisation de l'eau ($kJ.kg^{-1}$)
L	Longueur du bassin (m)
\dot{m}_{em}	Débit massique de l'eau de mer entrant ($kg.s^{-1}$)
\dot{m}_{ev}	Débit massique de l'eau évaporée ($kg.s^{-1}$)
\dot{m}_s	Débit massique de saumure sortant ($kg.s^{-1}$)
T_{amb}	Température ambiante (K)
$T_{s,sor}$	Température de saumure à la sortie (K)
T_c	Température de cuivre (K)
T_{fc}	Température du fluide caloporteur (K)
$T_{fc,en}$	Température d'entrée de fluide caloporteur (K)
T_{ve}	Température du verre externe (K)
T_{vi}	Température du verre interne (K)
T_{em}	Température de l'eau de mer (K)
$T_{em,en}$	Température d'entrée de l'eau de mer (K)
T_{ciel}	Température de ciel (K)
t	Temps (s)
V_c	Volume du cuivre (m^3)
V_{fc}	Volume du fluide caloporteur (m^3)
V_v	Volume du verre (m^3)
V_{em}	Volume de l'eau de mer (m^3)

α'_c	Fraction de l'énergie solaire absorbée par une plaque de cuivre, sans dimension
α'_v	Fraction de l'énergie solaire absorbée par le verre, sans dimension
α'_{em}	Fraction de l'énergie solaire absorbée par l'eau de mer, sans dimension
Γ	Masse d'eau distillée (kg)
λ_v	Conductivité thermique du verre ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
ρ_c	Masse volumique du cuivre (kg.m^{-3})
ρ_{em}	Masse volumique de l'eau de mer (kg.m^{-3})
ρ_{fc}	Masse volumique du fluide caloporteur (kg.m^{-3})
ρ_v	Masse volumique du verre (kg.m^{-3})

1 Introduction

Les procédés de dessalement par distillateurs thermiques peuvent être classés en deux catégories [1]: distillateur passif et distillateur actif. Les processus passifs sont tels que tous les composants sont intégrés dans le système tandis que dans les processus actifs, l'apport supplémentaire de chaleur vient d'un élément extérieur tel que les capteurs solaires.

Plusieurs pays de tiers-monde utilisent les distillateurs solaires pour la production d'eau potable à partir d'eau salée. Malik et al. [2] ont montré que la distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités.

Le distillateur solaire est un bassin qui enferme l'eau saline. Il est utilisé pour épurer cette eau. Il est couvert d'un transparent constitué en verre ou plastique. La couverture emprisonne l'énergie solaire dans le bassin, qui chauffe alors l'eau saline. Ceci cause l'évaporation et la condensation sur la surface intérieure de la couverture transparente inclinée. L'eau se condense sur la face interne de la couverture et retombe dans la cuvette, qui rassemble le distillat. Le distillat obtenu ne contient ni le sel, ni les autres composants chimiques.

Des études paramétriques et des méthodes d'optimisation ont appliquées sur ce genre de distillateur dans le but d'augmenter la productivité [3-6]. L'intérêt principal de ces dispositifs est qu'elles sont autonomes et ne demandent pas beaucoup d'entretien [4]. Pour les distillateurs solaires passifs, Tiwari et al. [7] ont développé un modèle du distillateur mettant en jeu les températures de l'eau de mer et du verre. Ils ont analysé l'effet de la gamme de température de fonctionnement sur les coefficients de transfert thermique. Le modèle a permis de décrire avec un bon accord les résultats expérimentaux des essais qu'ils ont conduits. Pour les processus actifs, Kalogirou [8] a étudié plusieurs types de capteurs solaires et analysé leur efficacité. Il a conclu que la productivité de ces installations est très influencée par la configuration géométrique de la cuve et les paramètres d'entrée du système.

Dans ce travail, nous étudions un distillateur solaire de type actif. Nous considérons que l'eau de mer reçoit une quantité de chaleur supplémentaire de la part du fluide caloporteur qui circule en bas d'une plaque en cuivre disposée au fond de la cuve. Les équations du système ont été obtenues en effectuant le bilan énergétique pour les différents éléments composant le distillateur [9]. Le modèle obtenu est résolu numériquement à l'aide du logiciel Matlab. Le modèle permet de rendre compte de la température d'entrée et du débit du fluide caloporteur, de la température et du débit instantané de l'eau de mer ainsi que de la température de l'air. Il permet de calculer en sortie le débit de l'eau distillée. Des calculs sont alors effectués pour évaluer l'influence des entrées et de la longueur du distillateur. Le but est de déterminer la conception optimale vis-à-vis du rendement du processus.

2 Description et modélisation du système

Le système de dessalement comprend deux circuits: le circuit primaire qui apporte la chaleur et le circuit secondaire dans lequel circule l'eau saumâtre à évaporer. Le fluide caloporteur chauffé à travers une paroi métallique en cuivre l'eau saumâtre à distiller. L'enveloppe en verre sert à la fois d'apport en rayonnement solaire qui peut se rajouter à la quantité de chaleur fournie par le circuit primaire. Cette enveloppe qui est au contact de l'air froide permet de condenser la vapeur d'eau qui peut ruisseler sur la face intérieure et peut ainsi être récupérée. La figure 1 présente le schéma de principe de cette installation.

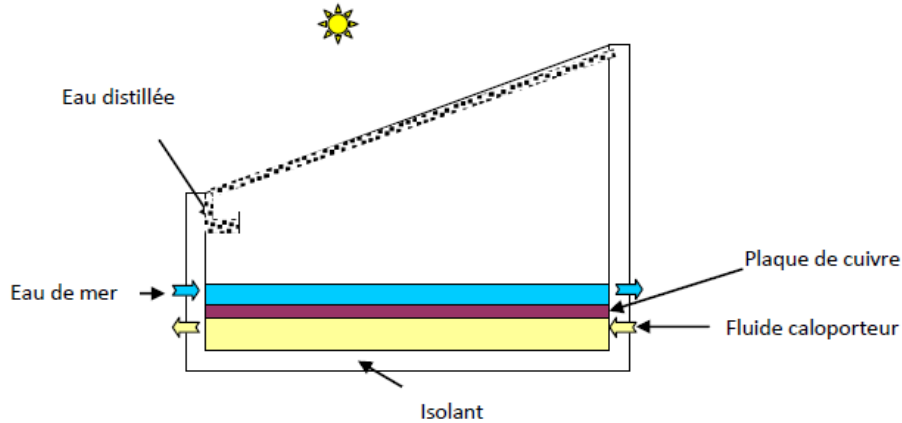


Figure 1: Configuration d'un distillateur solaire actif

Le modèle mathématique du système intégré peut être développé à base des bilans massique et énergétique [9]. Le bilan massique concerne le débit de l'eau de mer circulant dans le circuit secondaire. La conservation des débits dans le circuit secondaire s'exprime par

$$\dot{m}_{em} = \dot{m}_{ev} + \dot{m}_s \quad (1)$$

Le bilan énergétique pour chaque partie du système s'écrit :

- Vitre extérieure

$$\frac{\rho_v V_v c_{p,v}}{2A_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) - hc_{ve_amb} (T_{ve} - T_{amb}) - hr_{ve_ciel} (T_{ve} - T_{ciel}) \quad (2)$$

- Vitre intérieure

$$\frac{\rho_v V_v c_{p,v}}{2A_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = \alpha'_v I(t) + (hc_{em_vi} + hr_{em_vi}) (T_{em} - T_{vi}) + \frac{\dot{m}_{ev} h_v}{A_v} - \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) \quad (3)$$

- Eau de mer

$$\begin{aligned} \rho_{em} V_{em} c_{p,em} \frac{dT_{em}}{dt} = & \alpha'_{em} A_{em} I(t) + hc_{c_em} A_{em} (T_c - T_{em}) + \dot{m}_{em} c_{p,em} T_{em,en} - \dot{m}_s c_{p,s} T_{s,sor} \\ & - \dot{m}_{ev} h_L - hc_{em_vi} A_{em} (T_{em} - T_{vi}) - hr_{em_vi} A_{em} (T_{em} - T_{vi}) \end{aligned} \quad (4)$$

A l'aide de l'équation (1), on peut substituer le débit massique de saumure dans l'équation (4) par $\dot{m}_s = \dot{m}_{em} - \dot{m}_{ev}$, d'où

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{em} V_{em} c_{p,em}}{A_{em}} \frac{dT_{em}}{dt} = & \alpha'_{em} I(t) + hc_{c_em} (T_c - T_{em}) + \frac{\dot{m}_{em} c_{p,em} T_{em,en}}{A_{em}} - \frac{(\dot{m}_{em} - \dot{m}_{ev}) c_{p,s} T_{s,sor}}{A_{em}} \\ & - \frac{\dot{m}_{ev} h_L}{A_{em}} - hc_{em_vi} (T_{em} - T_{vi}) - hr_{em_vi} (T_{em} - T_{vi}) \end{aligned} \quad (5)$$

- Plaque de cuivre

$$\frac{\rho_c V_c c_{p,c}}{A_c} \frac{dT_c}{dt} = \alpha'_c I(t) + hc_{fc_c} (T_{fc} - T_c) - hc_{c_em} (T_c - T_{em}) \quad (6)$$

- Fluide caloporteur

$$\frac{\rho_{fc} V_{fc} c_{p,fc}}{A_{fc}} \frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{2\rho_{fc} D_{fc} c_{p,fc}}{A_{fc}} (T_{fc,en} - T_{fc}) - hc_{fc_c} (T_{fc} - T_c) - U_{perte} (T_{fc} - T_{amb}) \quad (7)$$

où hc_{ve_amb} est le coefficient d'échange par convection avec l'air ambiant, hr_{ve_ciel} le coefficient d'échange par rayonnement avec le ciel, hc_{c_em} le coefficient de convection entre la plaque de cuivre et l'eau de mer, hc_{em_vi} le coefficient de convection entre l'eau de mer et la vitre interne, hr_{em_vi} le coefficient d'échange par rayonnement entre l'eau de mer et la vitre interne, $hc_{fc \rightarrow c}$ est le coefficient d'échange par convection entre le fluide caloporteur et le cuivre et U_{perte} le coefficient de convection de perte.

Les coefficients de transferts de chaleur peuvent être évalués par des corrélations précises. Ils sont donnés dans [9].

La masse d'eau distillée est donnée par :

$$\Gamma = \int_0^{t_c} \dot{m}_{ev}(t) dt \quad (8)$$

où t_c est la durée pour calculer la masse d'eau distillée.

2 Résultats et Discussion

Les propriétés thermophysiques du système correspondent aux valeurs qui ont été utilisées dans [9]. Plusieurs essais ont été effectués afin d'évaluer l'influence des facteurs suivants: la température d'entrée de fluide caloporteur $T_{fc,en}$, la température d'entrée de l'eau de mer $T_{em,en}$ et la longueur de la cuve d'évaporation L sur la masse d'eau distillée Γ . Les intervalles contenant les paramètres utilisés dans l'étude sont $T_{fc,en} \in [80;90]^\circ\text{C}$, $T_{em,en} \in [20;30]^\circ\text{C}$ et $L \in [3;7]\text{m}$.

Nous avons pris comme données : l'épaisseur de l'eau de mer dans la cuve égale à 4cm ; le débit de l'eau de mer est $0.015\text{m}^3/\text{h}$ et le débit de fluide caloporteur est $1.4\text{m}^3/\text{h}$.

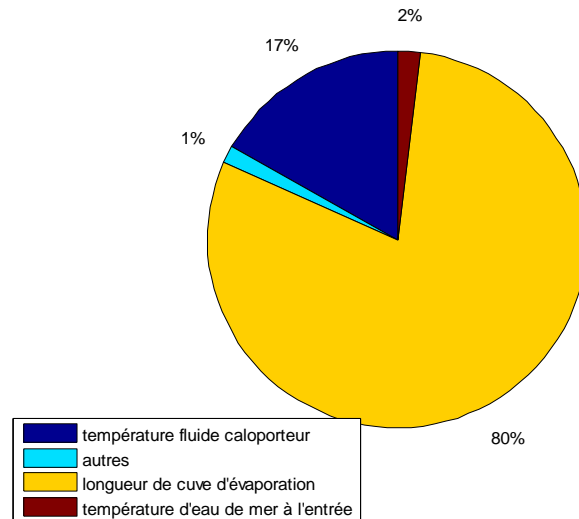


Figure 2: Effets de facteurs sur la masse de l'eau distillée

La figure 2 montre l'influence des paramètres d'étude sur la masse d'eau distillée.

D'une part, on remarque que la longueur de la cuve d'évaporation est le facteur qui influence le plus la production d'eau douce. Il est suivi par la température du fluide caloporteur.

Pour la température d'entrée de l'eau de mer, on remarque que dans l'intervalle d'étude son effet est très faible sur la production d'eau distillée.

La corrélation obtenue est donnée par le polynôme quadratique suivant

$$\Gamma = 61.16 - 41.84T_{fc,en} - 83.28T_{em,en} - 10.36L + 44.21T_{fc,en}T_{em,en} + 8.97T_{fc,en}L + 2.47T_{em,en}L - 0.41T_{fc,en}^2 + 20.18T_{em,en}^2 - 0.108L^2 \quad (9)$$

Ce polynôme quadratique donne explicitement la masse d'eau distillée produite en fonction des paramètres d'entrée. Le coefficient de corrélation calculé dépasse 99.5% .

2 Conclusion

Nous avons étudié dans ce travail, un distillateur solaire actif avec récupération de chaleur par échange avec l'eau de mer entrant dans la cuve. Une étude paramétrique a été effectuée en fonction des paramètres: température d'entrée du fluide caloporteur, température d'entrée de l'eau de mer et longueur de la cuve. L'analyse de variance a montré que dans le domaine des paramètres étudiés la longueur de la cuve a un effet considérable sur l'eau distillée produite par le dispositif. Plutôt que d'envisager une récupération de la chaleur pour chauffer l'eau de mer en entrée, il est plus rentable dans ce cas de rallonger la longueur de la cuve. L'effet de la température de l'eau de mer est resté négligeable tant que cette température ne dépasse pas la valeur 30°C.

Références

- [1] H.M. Qiblawey, F. Banat, Solar thermal desalination technologies, Desalination 220 (2008) 633 644.

-
- [2] M.A.S. Malik, GN. Tiwari, A. Kumar, M.S. Sodha, Solar Distillation, Pergamon Press Ltd, UK, 1982.
- [3] L.G. Rodriguez, Seawater desalination driven by renewable energies: a review, Desalination 143 (2002) 103-113.
- [4] H.E.S. Fath, Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, a simple technology and a clean environment, Desalination 116 (1998) 45-56.
- [5] S.K. Shukla, V.P.S. Sorayan, Thermal modeling of solar stills: an experimental validation, Renew. Energy 30 (2005) 683-699.
- [6] F. Agyenim, N. Hewitta, Ph. Eames, M. Smytha, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), Renew. Sust. Energ. Rev. 14 (2010) 615-628.
- [7] G.N. Tiwari, S.K. Shukla, I.P. Singh, Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature, Desalination 154 (2003) 171-185.
- [8] S.A. Kalogirou, Seawater desalination using renewable energy sources, Progress in Energy and Combustion Science 31 (2005) 242-281.
- [9] H. Osman Ali, A. Khamlichi, Modelling an active solar still for sea water desalination process optimization, Desalination 354 (2014), pp.1-8.